

1 Einleitung

Introduction

Im ersten Kapitel dieser Dissertation wird zunächst die Ausgangssituation der additiven Fertigung sowie der Automatisierung beschrieben. Anschließend wird die Zielsetzung der Arbeit definiert und der Forschungsansatz mit abgeleiteter Forschungshypothese erläutert. Das Kapitel schließt mit der Beschreibung des Aufbaus der Arbeit ab.

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Initial situation and motivation

In der heutigen globalisierten Wirtschaft werden die am Markt partizipierenden Unternehmen kontinuierlich mit technologischen und wirtschaftlichen Herausforderungen konfrontiert. Neben dem erhöhten Kostendruck aufgrund des globalisierten Wettbewerbs haben Kunden zunehmend höhere Qualitätsansprüche bei möglichst schnellen Lieferzeiten [BOOS17b, S. 8]. Zum langfristigen Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens sind daher regelmäßige Innovationen unerlässlich [BMW19, S. 6]. Insbesondere in den letzten Jahren konnte sich die additive Fertigung als eine Schlüsseltechnologie bei der Herstellung von komplexen Bauteilen etablieren und somit einen signifikanten Beitrag zum Ausbau der technologischen Leistungsfähigkeit produzierender Unternehmen leisten [WOHL22, S. 22-28], [WOHL23a].

Additive Fertigungstechnologien zeichnen sich durch einen schichtweisen Materialauftrag aus. Hierdurch wird die Fertigung von komplexen Bauteilen bei einem hohen Individualisierungsgrad ermöglicht [KLOC15, S. 163], [ZEYN17, S. 115]. Des Weiteren ist eine erweiterte Funktionsintegration bei Bauteilen möglich [BMBF19, S. 4]. Ein weiterer Vorteil der additiven Fertigung ist die Unabhängigkeit der Herstellungskosten von der gefertigten Losgröße, da keine Werkzeuge oder Vorrichtungen benötigt werden. Konturnahe Kühlkanäle, Leichtbau- sowie bionische Strukturen sind somit typische Anwendungsfälle der additiven Fertigung [WOHL22, S. 33-37].

Über die letzten 30 Jahre verzeichnete der weltweite Umsatz aller additiv hergestellten Produkte und Dienstleistungen eine durchschnittliche jährliche Wachstumsrate von 26,7 % [WOHL20, S. 91] mit einem absoluten Umsatz in Höhe von 18 Mrd. USD (vgl. Abbildung 1-1) [WOHL23b]. Auch in der nahen Zukunft wird von einem Fortschreiten der bisherigen Wachstumsentwicklung ausgegangen, sodass eine Prognose für das Jahr 2024 den Umsatz mit additiven Produkten und Dienstleistungen auf 40,8 Mrd. USD beziffert 2024 [ILIC21]. Die globalen Entwicklungszahlen des additiven Marktes gelten dabei in analoger Weise für den deutschen Markt [BMBF19, S. 4].

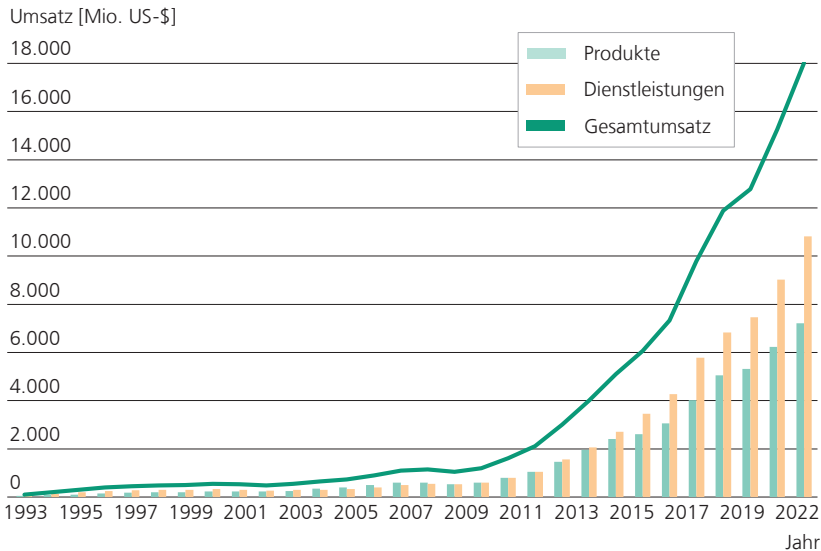


Abbildung 1-1: Umsatzentwicklung der additiven Fertigung i. A. a. WOHLERS [WOHL22, S. 128] [WOHL23b]

Revenue development of additive manufacturing according to WOHLERS

Eine additive Fertigungstechnologie mit hoher industrieller Relevanz ist das pulverbettbasierte Laserstrahlschmelzen (nachfolgend Laser Powder Bed Fusion bzw. LPBF genannt) [WOLL20, S. 108]. Bei dieser Technologie wird Metallpulver schichtweise mittels Laser aufgeschmolzen, sodass die erstarrte Metallschmelze den entsprechenden Querschnitt des Bauteils abbildet. Schicht für Schicht wird das Bauteil somit zu einem Volumenkörper aufgebaut [GEBH16, S. 164 ff.], [WOHL22, S. 83f.]. Die so hergestellten Bauteile weisen eine Dichte von nahezu 100 % auf, wobei vergleichbare mechanische Werkstückeigenschaften wie bei der konventionellen Bauteilherstellung erzielt werden. Wie ein großer Anteil der additiven Fertigungsverfahren bedarf LPBF einer umfangreichen Weiterbearbeitung mittels konventioneller Fertigungsverfahren [BMBF19, S. 4], [WOHL21, S. 5], [BASS22, S. 6]. Dies lässt sich mit der Entfernung von Stützstrukturen, der Reduzierung von Oberflächenrauheiten, induzierten Eigenspannungen und Formabweichungen begründen [VDI15, S. 22 ff.]. Während der additive Bauprozess und Weiterbearbeitungsprozesse wie die Zerspanung größtenteils automatisiert sind, weisen insbesondere die Prozessschritte der Stützstrukturentfernung, der Bauteilsäuberung sowie der allgemeinen Handhabung hohe manuelle Arbeitsanteile auf [ZEYN17, S. 83 ff.], [MÖHR18, S. 15 ff.], [BMBF19, S. 26]. Eine Automatisierung der additiven Prozesskette ist somit ein signifikanter Faktor für die Steigerung der Produktivität, die Senkung der Herstellkosten und damit für den Anstieg der technologischen Leistungsfähigkeit eines Unternehmens [HESS00, S. 2], [WOHL20, S. 189], [HORS21a, S. 97]. Die Automatisierung der additiven Prozesskette zur Reduzierung der Durchlaufzeit und

Stückkosten wird als wesentliche Herausforderung in mehreren Studien benannt [MÖHR17], [BASS22, S. 16], [WOHL22, S. 243-246].

1.2 Zielsetzung

Objective

Im folgenden Unterkapitel wird die Zielsetzung dieser Arbeit erläutert. Im weiteren Verlauf der Dissertation findet nach Beleuchtung der theoretischen Grundlagen (Kapitel 2) und existierender relevanter Ansätze (Kapitel 3) eine Konkretisierung der Zielsetzung durch die Formulierung der Forschungsfragen statt. Diese leiten sich aus dem Handlungsbedarf der Theorie sowie der Praxis ab.

Die Fertigungstechnologie LPBF besitzt großes Potenzial, Unternehmen zu einer höheren technologischen Leistungsfähigkeit zu befähigen. Hierfür ist jedoch erforderlich, dass industrielle Lösungen für die derzeitigen Herausforderungen in Form der vergleichsweise geringen Produktivität, hohen Kosten, fehlenden Standards sowie der Automatisierung erarbeitet werden [BASS22, S. 16], [WOHL22, S. 243-246]. Aus den genannten Herausforderungen kann das übergeordnete Ziel dieser Arbeit wie folgt definiert werden:

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist die Industrialisierung der additiven Prozesskette mit Pulverbettverfahren zur Steigerung der Produktivität.

In diesem Kontext ist die Automatisierung der additiven Prozesskette von großer Bedeutung. Entsprechende Automatisierungslösungen reduzieren die Durchlaufzeit und erhöhen die Produktivität, sodass geringere Herstellkosten resultieren [FAVR04, S. 4 ff.], [BMBF19, S. 26]. Wie bereits bei der Ausgangssituation beschrieben, erfordern mit LPBF hergestellte Bauteile eine umfangreiche Weiterbearbeitung, um den qualitativen Kundenanforderungen zu entsprechen. Die Weiterbearbeitung lässt sich dabei in einzelne Prozessschritte gliedern: Direkt nach der additiven Fertigung erfolgt die Entfernung von überschüssigem Pulver, gefolgt von einer Wärmebehandlung. Anschließend werden die additiven Bauteile von der Bauplatte getrennt, sodass Stützstrukturen entfernt werden können. Abschließend wird die Zielgeometrie mittels subtraktiver Verfahren erzielt und eine Oberflächenbearbeitung zur Realisierung geringer Oberflächenrauheiten durchgeführt. Die Vielzahl an Prozessschritten zeigt, dass eine ganzheitliche Betrachtung der additiven Prozesskette erforderlich ist, um die fertigungstechnologischen Restriktionen vollumfänglich zu berücksichtigen. Insbesondere die Berücksichtigung nicht-wertschöpfender Prozessschritte wie die Handhabung von Bauteilen ist essenziell, um eine durchgängige Automatisierung über verschiedene Fertigungsverfahren hinweg zu ermöglichen.

Im Bereich der konventionellen Fertigung – bspw. in der Automobilindustrie – existieren bereits Automatisierungskonzepte und -vorgehensweisen zur ganzheitlichen Automatisierung von Prozessketten. Zudem verdeutlicht das Beispiel des Werkzeugbaus, dass Automatisierungslösungen

auch im Umfeld einer variantenreichen Fertigung von komplexen Bauteilen bei kleiner Losgröße erfolgreich eingesetzt werden können [BOOS17a]. Eine Adaption dieser Lösungen für die additive Prozesskette ist jedoch aufgrund der notwendigen Berücksichtigung von bspw. Pulverhandhabung, Stützstrukturen und Formabweichungen nicht trivial. Daher ist ein ganzheitlicher methodischer Ansatz für die additive Prozesskette erforderlich [BMBF14, S. 10], [BASS22, S. 16]. Einerseits müssen hierfür die additiven Bauteile und andererseits die jeweiligen Fertigungsverfahren entsprechend ihrer Eigenschaften berücksichtigt werden. Zudem ist die Betrachtung von ökonomischen sowie individuellen Restriktionen erforderlich.

Das konkrete Ziel dieser Arbeit ist ein ganzheitlicher Ansatz zur Entwicklung von Automatisierungskonzepten für die additive Prozesskette mit Pulverbettverfahren unter Berücksichtigung von fertigungstechnischen, ökonomischen und unternehmensindividuellen Restriktionen.

Sowohl die übergeordnete als auch die konkrete Zielsetzung werden in den folgenden zwei Kapiteln konkretisiert. Insbesondere die Ableitung des Handlungsbedarfs aus der Praxis (vgl. Kapitel 2.5) und der Theorie (vgl. Kapitel 3.4) sind in diesem Kontext von Bedeutung.

1.3 Aufbau der Arbeit

Structure of the thesis

Diese Dissertation folgt dem systemtheoretischen Ansatz. Dabei handelt es sich um einen „interdisziplinären Ansatz, der alle Gestaltungs- und Führungsprobleme von produktiven sozialen Systemen darstellt“ [ULRI76, S. 308]. Fokus des Ansatzes ist eine Problemstellung aus der Praxis, die aus wissenschaftlicher und praktischer Sicht beleuchtet wird, um Schlussfolgerungen ableiten zu können [ULRI84, S. 31]. Demnach richtet sich der Aufbau dieser Arbeit hinsichtlich der Phasen der angewandten Forschung nach ULRICH. Für weitere Ausführungen zum zugrundeliegenden Forschungsansatz sei an dieser Stelle auf den Anhang verwiesen (siehe Anhang A).

Die erste Phase des Forschungsprozesses widmet sich der empirisch-induktiven und der terminologisch-deskriptiven Aufgabenstellung, in der die Grundlagen zum Forschungsthema erarbeitet werden. Definition und Beschreibung bekannter Wirkzusammenhänge sind somit Bestandteil dieser Phase und ermöglichen die Formulierung einer Forschungshypothese. Im darauffolgenden Abschnitt des Prozesses werden analytisch-induktive Erkenntnisse aus den empirischen Daten gezogen und dann analytisch-deduktiv konkretisiert. Abschließend werden die erworbenen Erkenntnisse mittels empirischer Beobachtungen geprüft. Im Kontext des kritischen Rationalismus handelt es sich hierbei um den Versuch, die aufgestellte Forschungshypothese zu falsifizieren. Der vorgestellte Forschungsprozess wird als Grundlage für die Strukturierung der Arbeit genutzt, die in sieben Kapitel gegliedert ist. In Abbildung 1-2 ist der Zusammenhang zwischen den Phasen der angewandten Forschung nach ULRICH und den Kapiteln dieser Arbeit dargestellt. [ULRI76]

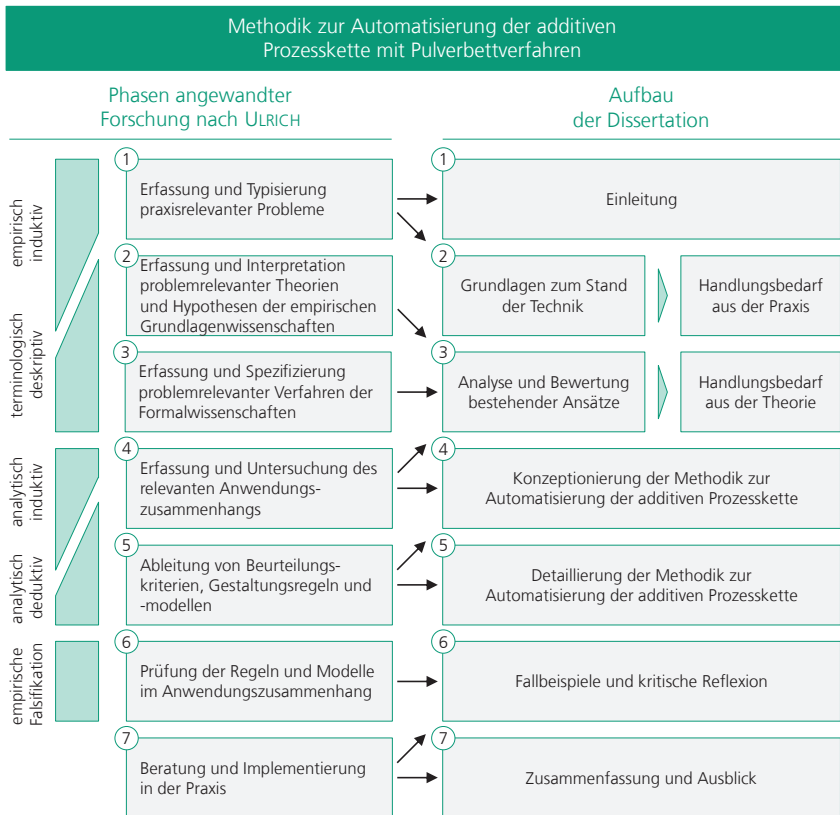


Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit nach den Phasen der angewandten Forschung nach ULRICH [ULRI76]

Structure of the thesis according to according to ULRICH

Im **ersten Kapitel** dieser Dissertation werden die Ausgangssituation und Motivation zur Erstellung dieser Arbeit dargelegt. Darauf aufbauend wird die Zielsetzung der Arbeit beschrieben und der grundlegende Forschungsansatz inklusive der Forschungshypothese beschrieben. Das Kapitel schließt mit der Darlegung des Aufbaus der Arbeit.

Das **zweite Kapitel** thematisiert die relevanten Grundlagen des Gestaltungs- und Betrachtungsbereichs. Zuerst werden notwendige Begrifflichkeiten definiert, um ein einheitliches Verständnis zu schaffen. Zudem werden relevante Grundlagen der additiven Prozesskette vorgestellt und die einzelnen Fertigungsverfahren der Prozesskette – sowohl additiv als auch konventionell – beschrieben. Anschließend erfolgt eine Beschreibung des Stands der Technik zur Automatisierungstechnik.

Hier werden die Grundlagen der Automatisierung vorgestellt und es wird eine Klassifizierung von Automatisierungssystemen vorgenommen. Nach der Beschreibung von Peripherie und Netzwerktechnik der Automatisierung wird das Kapitel mit der Ableitung des Handlungsbedarfs aus der Praxis abgeschlossen.

Im **dritten Kapitel** werden bestehende Ansätze, die zumindest teilweise mit der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit übereinstimmen, analysiert. Dazu werden zunächst Anforderungen an eine Methodik zur Automatisierung der additiven Prozesskette definiert. Anschließend werden die entsprechenden Ansätze vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung zur Erreichung der Zielsetzung dieser Dissertation bewertet. Hieraus leitet sich der Handlungsbedarf aus der Theorie ab, sodass die Forschungshypothese zum Abschluss des Kapitels mit einzelnen Forschungsfragen konkretisiert werden kann.

Die Konzeption einer Methodik zur Automatisierung der additiven Prozesskette erfolgt im **vierten Kapitel**. Eingeführt wird das Kapitel mit der Beschreibung der Grundlagen von Systemen, Modellen und Methoden, gefolgt von der Darlegung des Ordnungsrahmens der Methodik. Anschließend werden die einzelnen Phasen der Methodik vorgestellt.

Im **fünften Kapitel** erfolgt eine Detaillierung der konzeptionierten Methodik. Es werden konkrete Methoden und Modelle entwickelt und eingesetzt, sodass eine praktische Umsetzung nach Vorgabe dieses Kapitels ermöglicht wird.

Das anschließende **sechste Kapitel** dient der Dokumentation der durchgeführten Fallbeispiele und somit zur Validierung der Methodik. Durch die Validierung wird die Eignung der entwickelten Methodik zur Adressierung des erklärten Forschungsziels praxisnah geprüft. Abschließend wird die Validierung kritisch reflektiert.

Im **siebten Kapitel** wird die wissenschaftliche Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige Fragestellungen und Probleme gegeben.